บทที่ 2

วารสารปริทัศน์

2.1 การวัดสมบัติทางความร้อน

2.1.1 การวัดค่าความร้อนจำเพาะ (Specific heat measurement)

ความร้อนจำเพาะเป็นปริมาณความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิของมวลสาร 1 หน่วย ไป 1 องศา ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะสามารถคำนวณจากค่าความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารกับอัตราส่วนโดยน้ำหนักขององค์ประกอบนั้น (Toledo, 1991) ดังสมการ (1)

$$C_p = \sum(C_{pi} X_i) \quad .....(1)$$

โดยความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหาร (C_{pi}) มีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิดังแสดงในตารางที่ 2.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนจำเพาะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารกับอุณหภูมิ

องค์ประกอบ	สมการ
ความชื้น	$C_p = 0.9975 - 2.17\times10^{-3}T + 1.31\times10^{-6}T^2$
โปรตีน	$C_p = 0.4797 + 2.89\times10^{-4}T - 3.14\times10^{-7}T^2$
ไขมัน	$C_p = 0.4739 + 3.52\times10^{-4}T - 1.15\times10^{-6}T^2$
เส้นใย	$C_p = 0.4409 + 4.61\times10^{-4}T - 1.11\times10^{-6}T^2$
เถ้า	$C_p = 0.2610 + 4.51\times10^{-4}T - 8.79\times10^{-7}T^2$
คาร์โบไฮเดรต	$C_p = 0.3699 + 4.69\times10^{-4}T - 1.42\times10^{-6}T^2$

นอกจากนี้ค่าความร้อนจำเพาะสามารถวัดได้หลายวิธีดังต่อไปนี้

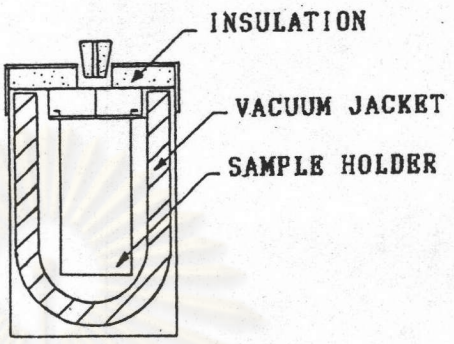
2.1.1.1 Method of mixture

วิธีนี้ทำโดยนำตัวอย่างใส่ลงในสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนที่ทราบค่าความร้อนจำเพาะซึ่งบรรจุในแคลอริมิเตอร์ ดังรูปที่ 2.1 จากนั้นวัดอุณหภูมิที่เปลี่ยนไปต่อเวลา เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในแคลอริมิเตอร์ ดังรูปที่ 2.2 แล้วคำนวณค่าความร้อนจำเพาะโดยใช้หลักการอนุรักษ์พลังงาน (Mohsenin, 1980) ดังสมการ (2)

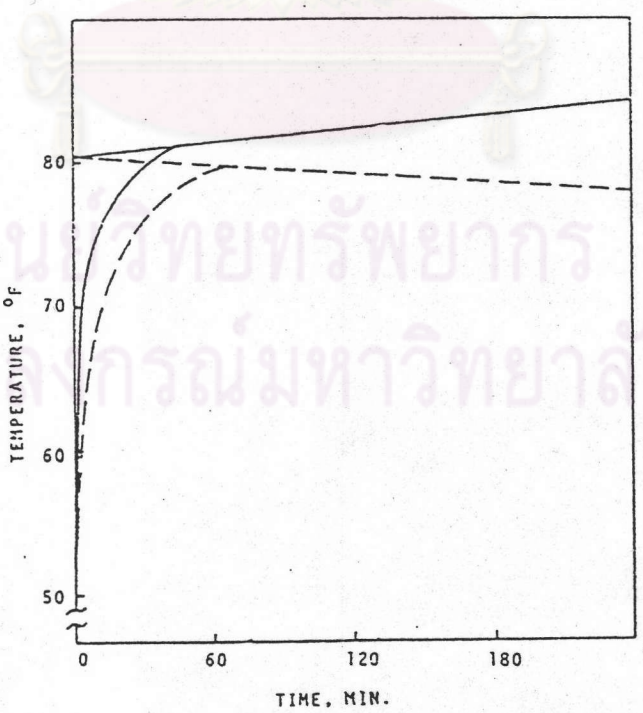
$$C_{ps}W_s(\Delta T_s) = C_{pw}W_w(\Delta T_w) + H_c(\Delta T_c) \quad .....(2)$$

วิธี method of mixture ไม่เหมาะกับตัวอย่างที่ละลายได้ในสารตัวกลาง เนื่องจากจะมีค่าความร้อนของการละลายเข้ามาเกี่ยวข้อง นอกจากนี้ตัวอย่างยังถูกทำลายด้วย ตัวอย่างอาหารที่ใช้วิธีนี้ในการหาค่าความร้อนจำเพาะ ได้แก่ ถั่วเหลือง

(Alam และ Shove, 1972) และมะพร้าว (Murakami, 1980) เป็นต้น



รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของแคลอริมิเตอร์



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำในแคลอริมิเตอร์

2.1.1.2 Modified method of mixture หรือ indirect mixing method

วิธีนี้มีความคล้ายคลึงและใช้หลักการอนุรักษ์พลังงานเช่นเดียวกับ method of mixture แต่ต่างกันที่วิธีนี้จะไม่ให้ตัวอย่างและสารตัวกลางที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนสัมผัสกัน ซึ่งทำได้โดยใส่ตัวอย่างลงในภาชนะบรรจุที่แยกออกจากสารตัวกลาง จากนั้นบันทึกการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เพื่อนำไปสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำในแคลอริมิเตอร์กับเวลา แล้วคำนวณหาค่าความร้อนจำเพาะออกมา วิธีนี้ไม่มีปัญหาเรื่องการละลายของตัวอย่างในสารตัวกลาง ดังนั้นจึงสามารถกำจัดปัญหาเกี่ยวกับค่าความร้อนของการละลายได้ (Kulacki และ Kennedy, 1978; Hwang และ Hayakawa, 1979) ตัวอย่างของอาหารที่ใช้วิธีนี้หาค่าความร้อนจำเพาะได้แก่ โดของคุกกี้ (Kulacki และ Kennedy, 1978) มะม่วง (Chowdary, 1988) และสับปะรด (สิรินาถ เมฆมณี, 2533)

2.1.1.3 Differential scanning calorimeter (DSC)

วิธีนี้ใช้หลักการวัดผลลัพธ์ของพลังงานที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความร้อนหรือความเย็นแก่ตัวอย่าง โดยเครื่อง DSC จะบันทึกผลในรูป thermogram ซึ่งพื้นที่ใต้ thermogram จะแสดงถึงพลังงานที่ได้รับหรือสูญเสียไปในขณะที่มีการให้ความร้อนหรือดึงความร้อนออกจากตัวอย่าง (Mohsenin, 1980) วิธีนี้มีข้อดีคือใช้ตัวอย่างปริมาณน้อย ให้ผลถูกต้องและรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือเครื่องมือราคาแพงมาก และการเตรียมตัวอย่างต้องกระทำด้วยความระมัดระวัง ตัวอย่างของอาหารที่ใช้ DSC หาค่าความร้อนจำเพาะเช่น ยาสูบ (Chakrabarti และ Johnson, 1972) และถั่วลิสง (Young และ Whitaker, 1973) เป็นต้น

2.1.1.4 Method of guarded plate

วิธีนี้เป็นการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่มีฉนวนหุ้มอยู่โดยรอบ โดยตัวอย่างจะได้รับความร้อนจากกระแสไฟฟ้าในเวลาที่กำหนด (t) ซึ่งค่าความร้อนจำเพาะเมื่อสมมติว่าไม่มีการสูญเสียความร้อนจากระบบ จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณความร้อนที่ตัวอย่างได้รับดังสมการ (3) (Mohsenin, 1980) คือ

$$C_p = 3.41\ VIt/W_s(T_2 - T_1) \qquad .....(3)$$

เมื่อ T_1, T_2 คือ อุณหภูมิของตัวอย่างที่เวลาเริ่มต้น และที่เวลา t ตามลำดับ

2.1.1.5 Method of comparison calorimeter

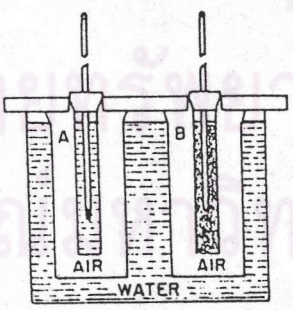
วิธีนี้ใช้กับตัวอย่างที่เป็นของเหลว โดยมีภาชนะ 2 ใบ ใบหนึ่งใส่น้ำกลั่น (A) อีกใบใส่ของเหลวที่ต้องการหาค่าความร้อนจำเพาะ (B) นำไปให้ความร้อนจนมีอุณหภูมิเท่ากัน และนำไปวางในแคลอริมิเตอร์เพื่อทำให้เย็น (Mohsenin, 1980) ดังรูปที่ 2.3 ค่าความร้อนจำเพาะจะคำนวณจากสมการ

$$C_{PS} = ((C_{PA}W_A + C_{PW}W_W)\triangle t_B - C_{PB}W_B\triangle t_A)/W_S\triangle t_A \quad .....(4)$$

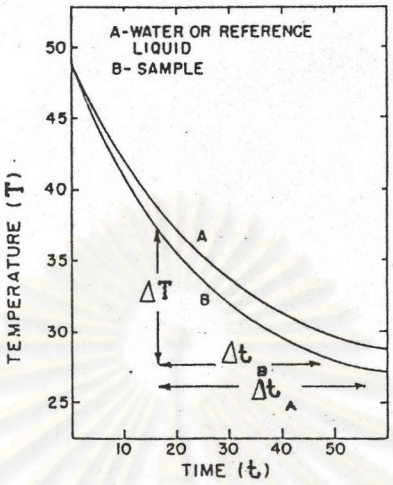
เมื่อ C_{PA}, C_{PB} คือ ความร้อนจำเพาะของภาชนะ A และภาชนะ B ตามลำดับ

W_A, W_B คือ น้ำหนักของภาชนะ A และภาชนะ B ตามลำดับ

$\triangle t_A$, $\triangle t_B$ คือ เวลาที่ใช้ลดอุณหภูมิลงเท่ากับ $\triangle T$ ของน้ำ และตัวอย่างตามลำดับ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 ภาพตัดขวางของ comparison calorimeter



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาของน้ำและตัวอย่าง ใน comparison calorimeter

2.1.2 การวัดค่าสภาพนำความร้อน

การนำความร้อน (conduction) เป็นการเกิด molecular interaction โดยโมเลกุลที่มีระดับพลังงานสูงกว่าจะถ่ายเทพลังงานให้กับโมเลกุลบริเวณใกล้เคียงที่มีระดับพลังงานต่ำกว่า การถ่ายเทพลังงานแบบนี้เกิดขึ้นได้ในทุก ๆ ระบบที่มีความแตกต่างของอุณหภูมิ (temperature gradient) และจะเกิดขึ้นได้ดีในของแข็ง ทั้งนี้เพราะโมเลกุลของของแข็งอยู่ใกล้กันมากกว่าโมเลกุลของของเหลว หรือแก๊ส (Bennett และ Myers, 1974; Welty, Wicks และ Wilson, 1984)

จาก Fourier equation (สมการที่ (5)) พบว่าการนำความร้อนที่ภาวะสมดุล อุณหภูมิของตัวอย่างในแต่ละจุดจะคงที่ และอัตราเร็วในการถ่ายเทความร้อนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความแตกต่างของอุณหภูมิ (Sweat, 1975)

$$Q/a = -k\, dT/dx \qquad .....(5)$$

ค่าสภาพนำความร้อนสามารถคำนวณจากค่าสภาพนำความร้อน (k_i) และสัดส่วนโดยปริมาตร (X_{vi}) ของแต่ละองค์ประกอบ และมีสมการความสัมพันธ์ (Toledo, 1991) ดังต่อไปนี้

$$k = \Sigma(k_i X_{vi}) \quad .....(6)$$

เมื่อ $X_{vi} = X_i \rho_c / \rho_i$

$\rho_c = 1/(\Sigma X_i / \rho_i)$

โดยสภาพนำความร้อน (k_i) และความหนาแน่น (ρ_i) ขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารสามารถคำนวณจากสมการความสัมพันธ์กับอุณหภูมิ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำความร้อนและความหนาแน่นขององค์ประกอบต่าง ๆ ในอาหารกับอุณหภูมิ

องค์ประกอบ	สมการ	
	k_i	ρ_i
ความชื้น	$k = 0.57109 + 0.0017625T - 6.7306\times10^{-6}T^2$	$\rho_i = 997.18 + 0.0031439T - 0.0037574T^2$
โปรตีน	$k = 0.1788 + 0.0011958T - 2.7178\times10^{-6}T^2$	$\rho_i = 1329.9 - 0.51814T$
ไขมัน	$k = 0.1807 - 0.0027604T - 1.7749\times10^{-7}T^2$	$\rho_i = 925.59 - 0.41757T$
เส้นใย	$k = 0.18331 + 0.0012497T - 3.1683\times10^{-6}T^2$	$\rho_i = 1311.5 - 0.36589T$
เถ้า	$k = 0.3296 + 0.001401T - 2.9069\times10^{-6}T^2$	$\rho_i = 2423.8 - 0.28063T$
คาร์โบไฮเดรต	$k = 0.2014 + 0.0013874T - 4.3312\times10^{-6}T^2$	$\rho_i = 1599.1 - 0.31046T$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกจากนี้ยังมีวิธีวัดค่าสภาพนำความร้อนโดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือ

2.1.2.1 Steady state method วิธีนี้ตัวอย่างที่ต้องการวัดจะอยู่ในภาวะสมดุล คือมีอุณหภูมิ ณ จุดใด ๆ คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา การหาค่าสภาพนำความร้อนทำได้โดยวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่าง และความแตกต่างของอุณหภูมิ

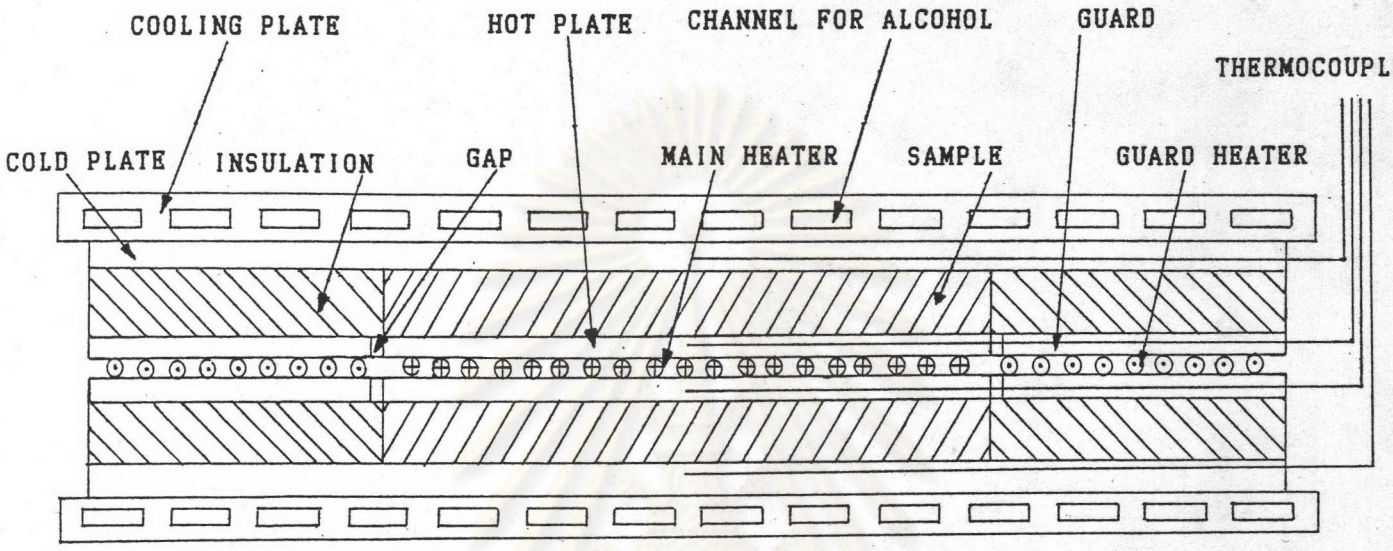
การวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ steady state อาจแบ่งได้เป็น 3 วิธีดังนี้

ก. Parallel plate method หรือ guarded hot plate method การหาค่าสภาพนำความร้อนวิธีนี้ทำโดยใส่ตัวอย่างลงในช่องว่างภายในเครื่องมือ (ดังรูปที่ 2.5) ให้ผิวด้านหนึ่งของตัวอย่างสัมผัสกับส่วนที่ทำหน้าที่ให้ความร้อน (hot plate) และผิวอีกด้านสัมผัสกับส่วนที่ทำหน้าที่รับความร้อน (cold plate) จากนั้นให้ความร้อนแก่ตัวอย่างจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล แล้วจึงวัดปริมาณความร้อนที่ให้แก่ตัวอย่าง และวัดอุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของตัวอย่าง เพื่อนำมาคำนวณค่าสภาพนำความร้อน จากสมการ (7)

$$Q = -ka\,(T_1 - T_2)/l \qquad .....(7)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่ผิวทั้งสองด้านของตัวอย่าง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 ภาพตัดขวางของ parallel plate apparatus

วิธีนี้ใช้ระยะเวลาในการทดลองมาก และอาจเกิดความผิดพลาดได้เนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนของ main heater ซึ่งทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่ hot plate นอกจากนี้อาจเกิดการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของ heat flow ที่บริเวณช่องว่างภายในตัวอย่างได้อีกด้วย ตัวอย่างงานวิจัยที่ใช้วิธีนี้เช่น freeze-dried gels (Saravacos และ Pilsworth, 1965) tomato paste (Drusas และ Saravacos, 1985) และนมผง (MacCarthy, 1985) เป็นต้น

ข. Concentric cylinder method การหาค่าสภาพนำความร้อนด้วยวิธีนี้ ทำโดยบรรจุตัวอย่างลงในช่องว่างรูปวงแหวนของเครื่องมือรูปทรงกระบอก ซึ่งสมมติว่ามีความยาวไม่จำกัดและมีการถ่ายโอนความร้อนในแนวรัศมี (รูปที่ 2.6) จากนั้นนำทรงกระบอกดังกล่าวไปวางไว้ในอ่างน้ำมันที่มีการให้ความร้อนแบบ steady state หรือใช้ heater ที่อยู่ด้านในของทรงกระบอกแทนก็ได้ (Reidy และ Rippen, 1971) ทั้งนี้เพื่อรักษา

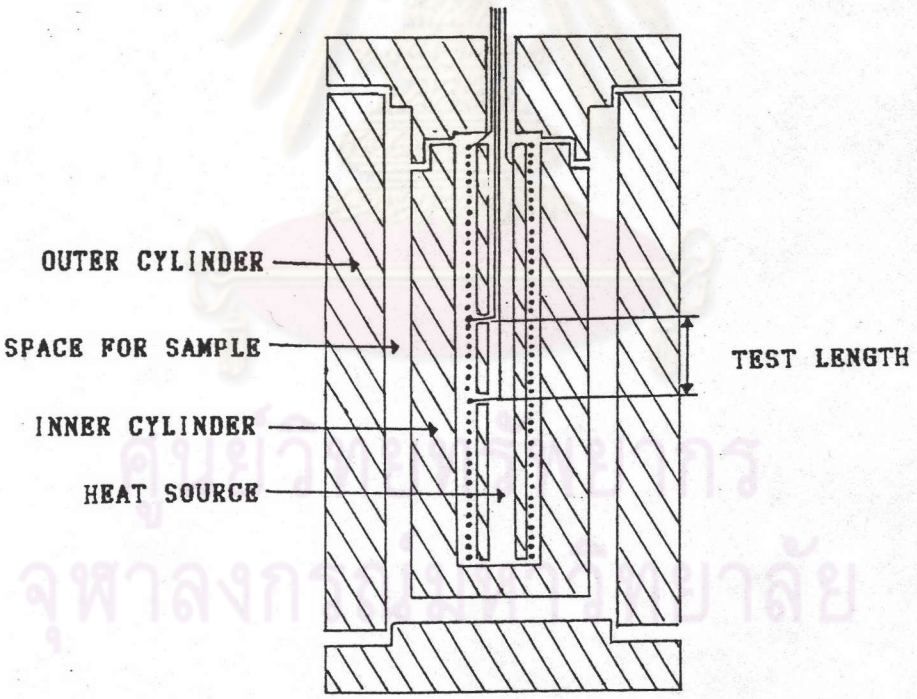
อุณหภูมิของระบบให้คงที่ ค่าสภาพนำความร้อนจะคำนวณได้จากสมการ (8)

$$Q = 2\pi l k (T_1 - T_2) / \ln (r_2/r_1) \quad .....(8)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมี r_1 และ r_2 ตามลำดับ

r_1 และ r_2 คือรัศมีภายในและรัศมีภายนอกของทรงกระบอก ตามลำดับ

วิธีนี้ส่วนใหญ่จะใช้กับตัวอย่างอาหารที่เป็นผง หรือเป็นเม็ดเล็ก ๆ เช่นผลิตภัณฑ์อาหารผง (Walters และ May, 1963)

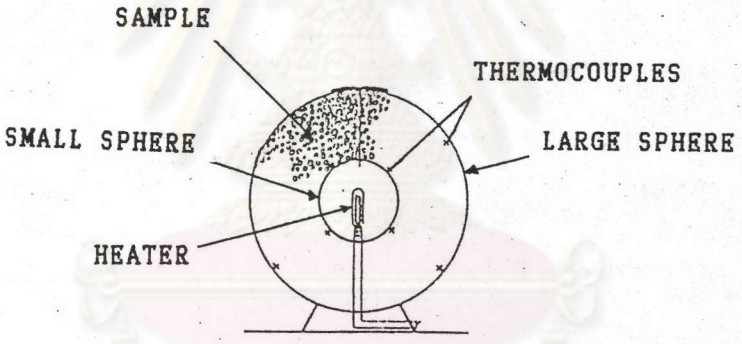


รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวางของ concentric cylinder apparatus

ค. Concentric sphere method วิธีนี้หาค่าสภาพนำความร้อนโดยบรรจุตัวอย่างลงในช่องว่างของเครื่องมือรูปร่างทรงกลมที่มีรัศมีภายใน r_1 และมีรัศมีภายนอก r_2 โดยมี heater ติดตั้งอยู่ภายในทรงกลมอันเล็ก ดังรูปที่ 2.7 จากนั้นนำเครื่องมือใส่ในกล่องหุ้มฉนวน ที่มีพัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศบริเวณรอบเครื่องมือ และให้ความร้อนจนเข้าสู่ภาวะสมดุลทางความร้อน ค่าสภาพนำความร้อนจะสามารถหาได้จากสมการ (9)

$$Q = 4\pi k(T_1 - T_2)\, r_1 r_2 / (r_2 - r_1) \qquad .....(9)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวอย่างที่รัศมีภายใน (r_1) และรัศมีภายนอก (r_2) ตามลำดับ



รูปที่ 2.7 Concentric sphere apparatus

ในทางทฤษฎี การหาค่าสภาพนำความร้อนที่ใช้หลัก steady state ที่ให้ความถูกต้องมากที่สุดคือ concentric sphere method เนื่องจากสามารถกำจัดความผิดพลาดอันเนื่องจากการสูญเสียความร้อนได้ แต่วิธีนี้ไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากหาตัวอย่างที่มีรูปร่างทรงกลมโดยแท้จริงได้ยาก และต้องตัดแบ่งครึ่งตัวอย่างทรงกลมเพื่อสอด heater ส่วนตัวอย่างที่เป็นเมล็ดธัญพืชก็ยากที่จะใส่ลงในทรงกลมในลักษณะที่เป็นเนื้อเดียวกัน และมีความหนาแน่นสม่ำเสมอ (uniform bulk density) ซึ่งทั้งหมดนี้จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความผิดพลาดในการวัด heat flow ได้ (Reidy และ Rippen, 1971)

การวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ steady state มีข้อดีคือ ใช้สมการทางคณิตศาสตร์แบบง่าย ๆ ในการคำนวณ และสามารถวัดค่าสภาพนำความร้อนของตัวอย่างที่เป็นของเหลว ผง หรือเมล็ดได้ แต่มีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับตัวอย่างอาหารกึ่งแข็งที่มีความชื้นมากกว่าร้อยละ 10 เนื่องจากจะเกิด moisture migration และใช้เวลานานหลายชั่วโมงในการทดลองแต่ละครั้ง รวมทั้งไม่สามารถกำจัดความผิดพลาดเนื่องจาก contact resistance ที่ผิวของตัวอย่างได้ นอกจากนี้ยังอาจเกิดการสูญเสียความร้อนจากเครื่องมืออีกด้วย

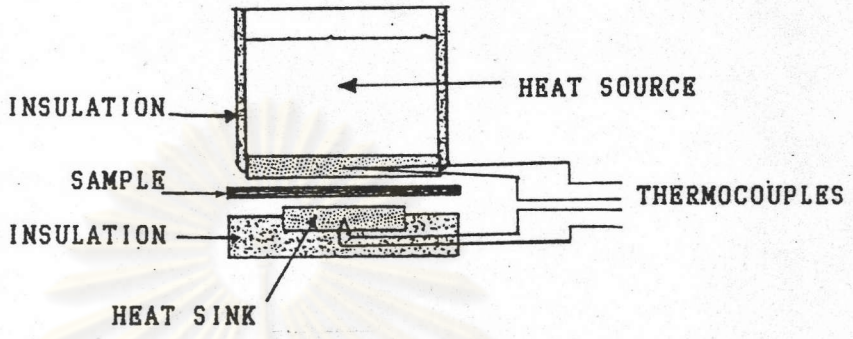
2.1.2.2 Transient หรือ unsteady state method เป็นการหาค่าสภาพนำความร้อนในขณะที่ตัวอย่างอยู่ในภาวะที่ไม่สมดุล โดยจะบันทึกอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงไป (ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อน) กับเวลา

การวัดค่าสภาพนำความร้อนแบบ transient method มีดังนี้

ก. Fitch method วิธีนี้ตัวอย่างที่ต้องการวัดจะถูกวางอยู่ระหว่าง copper blocks 2 แผ่น copper block แผ่นบนจะเป็นตัวให้ความร้อน (heat source) และแผ่นล่างจะเป็นตัวรับความร้อน (heat sink) ซึ่งอุณหภูมิที่เวลาต่าง ๆ ของ copper blocks ทั้ง 2 แผ่นสามารถวัดโดยใช้ thermocouple การหาค่าสภาพนำความร้อนโดยวิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองน้อย และใช้อุปกรณ์ไม่มาก แต่ค่าที่ได้มีความผิดพลาดสูงเนื่องจากเกิดการสูญเสียความร้อนจากตัวรับความร้อน และแรงกดที่ใช้อาจทำให้ของเหลวในตัวอย่างไหลออกมา หรือเป็นผลให้สมบัติทางกายภาพและความหนาของตัวอย่างเปลี่ยนไป (Reidy และ Rippen, 1971) สำหรับสมการที่ใช้หาค่าสภาพนำความร้อนคือ

$$\ln (T_1 / T_2) = (kA/W_H C_{PH} l)t \quad .....(10)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิของตัวให้ความร้อน และตัวรับความร้อน ตามลำดับ



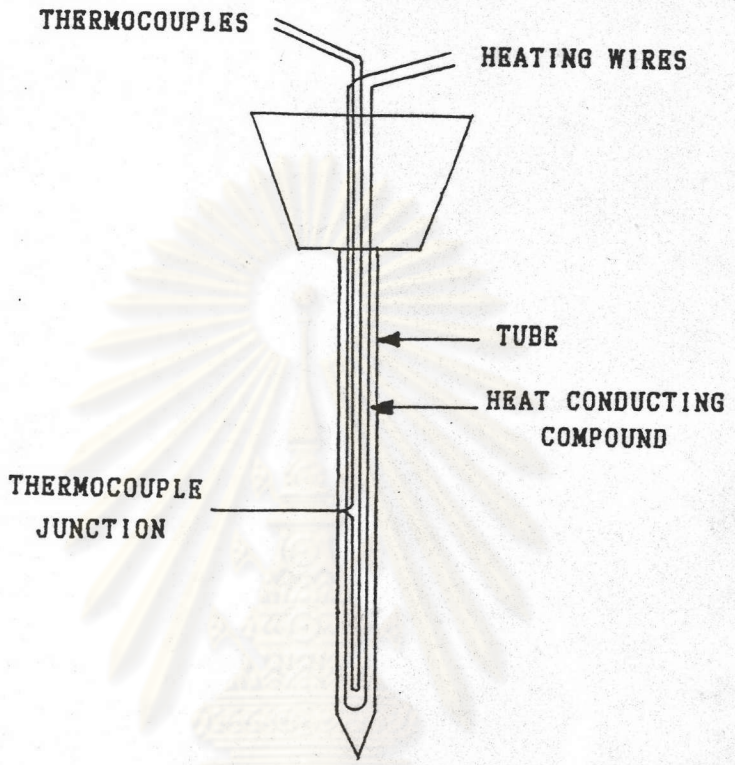
รูปที่ 2.8 เครื่องมือหาค่าสภาพนำความร้อนโดย Fitch

ข. Probe method เป็นวิธีหาสภาพนำความร้อนที่นิยมใช้ในปัจจุบัน วิธีนี้พัฒนามาจาก line heat source method รูปร่างของ thermal conductivity probe มีลักษณะเป็นเข็มขนาดเล็กภายในเป็นท่อกลวง ซึ่งมี heating wire เป็นแหล่งให้ความร้อน และมี thermocouple สำหรับวัดอุณหภูมิ (รูปที่ 2.9) การหาค่าสภาพนำความร้อนทำโดยเสียบ probe เข้าไปในตัวอย่างที่อยู่ในภาวะสมดุลทางความร้อน จากนั้นให้ความร้อนแก่ heating wire แล้วบันทึกอุณหภูมิของตัวอย่างในเวลาสั้น ๆ ค่าสภาพนำความร้อนจะคำนวณจากความชันของเส้นตรงที่ได้จากการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ln ของเวลากับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ดังสมการ (11)

$$T_2 - T_1 = (q/4\pi k) \ln (t_2/t_1) \quad .....(11)$$

เมื่อ T_1 และ T_2 คืออุณหภูมิที่เวลา t_1 และ t_2 ตามลำดับ

018211



รูปที่ 2.9 ภาพตัดขวางของ thermal conductivity probe

ข้อเสียของ thermal conductivity probe คือไม่เหมาะสำหรับ non-viscous food เนื่องจากจะเกิดการถ่ายโอนความร้อนแบบการพาขึ้นรอบ ๆ probe นอกจากนี้ยังไม่สามารถใช้กับตัวอย่างที่มีความบางมาก เช่น หนังสัตว์ได้ ทั้งนี้เนื่องจากต้องมีตัวอย่างอยู่รอบ probe ในปริมาณที่มากพอ อย่างไรก็ตาม การใช้ probe ยังได้รับความนิยมเนื่องจากเสียเวลาในการทดลองน้อย เหมาะกับอาหารที่มีความชื้นสูง หรืออาหารแช่แข็งและไม่มีการสูญเสียความร้อนขณะทำการทดลอง นอกจากนี้ยังเหมาะกับตัวอย่างที่อยู่ในสภาพธรรมชาติอีกด้วย กล่าวคือสามารถหาค่าสภาพนำความร้อนของผลไม้บนต้นได้ อีกทั้งยังใช้ได้ดีกับตัวอย่างที่อยู่ในระหว่างการแปรรูป (Reidy และ Rippen, 1971)

ตัวอย่างอาหารที่ใช้ thermal conductivity probe ในการหาค่าสภาพนำความร้อน ได้แก่ แอปเปิล (Lozano, Urbicain และ Rotstein, 1979) ขนมปัง (Unklesbay และคณะ, 1982) ตับวัวแช่แข็ง (Barrera และ Zaritzky, 1983) น้ำมะเขือเทศเข้มข้น (Choi และ Okos, 1983) beef loaf (McProud และ Lund, 1983) แป้งถั่วเหลืองพร่องไขมัน (Wallapapan และคณะ, 1984) มะม่วง (Chowdary, 1988) และสับปะรด (สิรินาถ เมฆมณี, 2533) เป็นต้น

2.1.3 การวัดค่าสภาพแพร่ความร้อน

การแพร่ความร้อนเป็นสมบัติทางความร้อนแบบหนึ่ง เกิดจากการที่วัตถุดูดซับความร้อนเอาไว้ เป็นผลทำให้อุณหภูมิเปลี่ยนแปลงไป ซึ่งพบในการนำความร้อนแบบ steady state ค่าสภาพแพร่ความร้อนมีความสัมพันธ์กับค่าความร้อนจำเพาะ ค่าสภาพนำความร้อน และค่าความหนาแน่น ดังนี้

$$\alpha = k/\rho C_p \qquad .....(12)$$

นอกจากจะหาค่าสภาพแพร่ความร้อนได้จากสมการ (12) แล้ว ในปัจจุบันยังมีวิธีอื่น ๆ ที่นิยมใช้ในการหาค่าดังกล่าวอีก ดังต่อไปนี้

2.1.3.1 การใช้ thermal conductivity probe (Mohsenin, 1980; Murakami, 1980) เครื่องมือประกอบด้วย thermocouples 2 อัน วางห่างจาก heating wire ใน probe เป็นระยะทาง "r" และมีแหล่งพลังงานเพื่อให้เกิดการแพร่ความร้อนจาก heating wire ใน probe ผ่านตัวอย่างไปยัง thermocouple ดังรูปที่ 2.10 ซึ่งค่าสภาพแพร่ความร้อนสามารถคำนวณจากสมการ (13) และ (14) ดังนี้

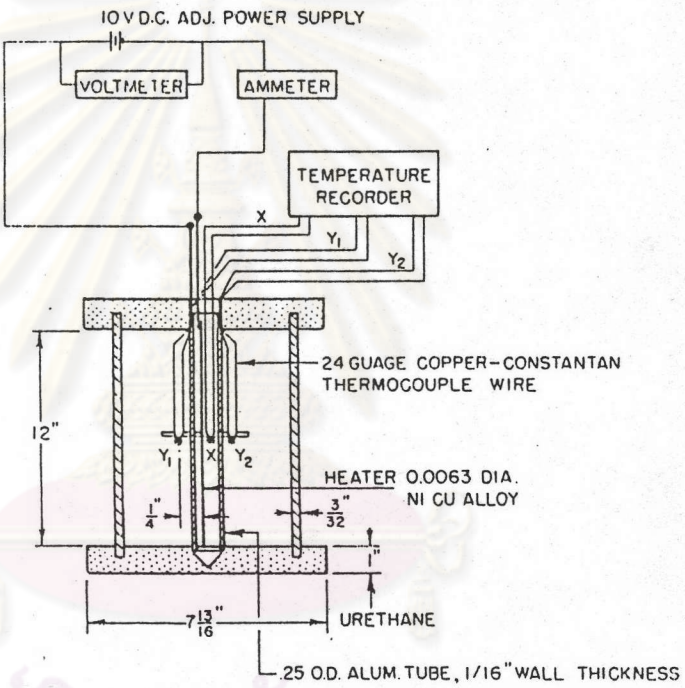
$$\Delta T = q/2\pi k \left[-0.58/2 - \ln \beta - \left\{ \sum (-1)^n \beta^{2n} /(n!)(2n) \right\}\right] \qquad ...(13)$$

$$\alpha = r^2/4\beta^2 t \qquad .....(14)$$

เมื่อ ΔT คือผลต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างอุณหภูมิของ thermocouples ทั้งสองกับอุณหภูมิเริ่มต้นที่เวลา t

n คือ 1,2,3...

วิธีนี้ใช้เวลาในการทดลองน้อย แต่เครื่องมือที่ใช้ค่อนข้างยุ่งยาก และจำเป็นต้องใช้เครื่องคอมพิวเตอร์เข้าช่วยในการคำนวณ

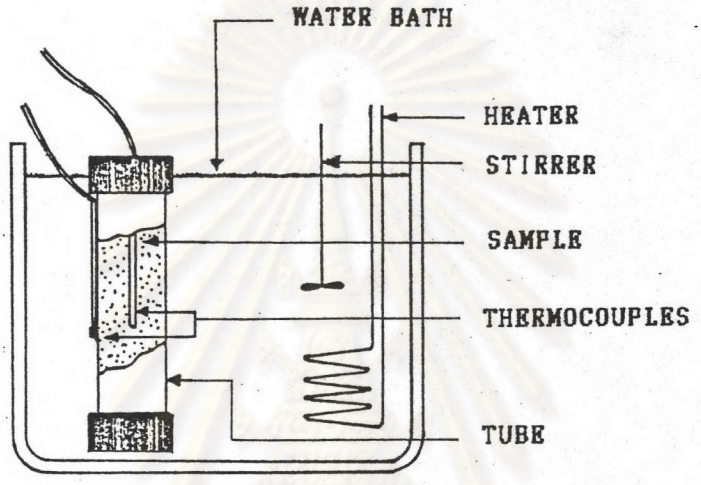


รูปที่ 2.10 Thermal conductivity probe สำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน

2.1.3.2 การใช้ thermal diffusivity tube เป็นการหาค่าสภาพแพร่ความร้อนในภาวะที่มีการถ่ายโอนความร้อนแบบ unsteady state โดย thermal diffusivity tube มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกยาว (รูปที่ 2.11) ทำจากวัสดุที่มีค่าสภาพนำความร้อนสูง ซึ่งจะใช้บรรจุตัวอย่างอาหารที่ต้องการหาค่าสภาพแพร่ความร้อน ท่อทรงกระบอกที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนของความยาวต่อเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่าห้า (Dickerson, 1965) สำหรับการวัดอุณหภูมิที่จุดกึ่งกลางของตัวอย่างในท่อ และที่ผนังด้านนอกของท่อจะใช้ thermocouple

ส่วนการให้ความร้อนแก่ตัวอย่างที่บรรจุในท่อจะใช้อ่างที่ควบคุมอัตราการเพิ่มอุณหภูมิได้ ซึ่งมีเครื่องกวนติดตั้งอยู่ ค่าสภาพแพร่ความร้อนสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างในท่อและที่ผนังด้านนอกของท่อกับเวลา ดังสมการ

$$\alpha = AR^2 / 4 (T_R - T_o) \quad .....(15)$$



รูปที่ 2.11 Thermal diffusivity tube สำหรับหาค่าสภาพแพร่ความร้อน

ตัวอย่างอาหารที่หาค่าสภาพแพร่ความร้อนโดยวิธีนี้ได้แก่ เชอรีมะเขือเทศ (Bhowmik และ Hayakawa, 1979) ผลิตภัณฑ์เนื้อเทียม (Rizvi, Blaisdell และ Harper, 1980) มะม่วง (Chowdary, 1988) และสับปะรด (ลิรินาถ เมฆมณี, 2533) เป็นต้น

2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหาร

ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหาร ได้แก่ ปัจจัยจากตัวของอาหารเอง คือ ปริมาณความชื้น และองค์ประกอบทางเคมีในอาหาร และปัจจัยจากภายนอก คืออุณหภูมิของอาหาร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

2.2.1 ปัจจัยจากตัวของอาหารเอง

อาหารประกอบด้วยองค์ประกอบต่าง ๆ หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีสมบัติทางความร้อนที่แตกต่างกันออกไป องค์ประกอบที่สำคัญในอาหารได้แก่

2.2.1.1 ความชื้น

น้ำนอกจากเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในอาหารแล้ว ยังมีสมบัติทางความร้อนที่สูงอีกด้วย กล่าวคือ ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส น้ำมีค่าความร้อนจำเพาะ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อน 0.579 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน และมีค่าสภาพแพร่ความร้อน 1.43×10^{-7} เมตร^2/วินาที ดังนั้นอาหารที่มีความชื้นสูงจึงมีสมบัติทางความร้อนสูงด้วย เช่น พบว่าค่าความร้อนจำเพาะของถั่วเหลืองเพิ่มขึ้นเมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น (Mohsenin, 1980) ส่วนข้าวสาลีจะมีค่าสภาพนำความร้อนสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำเป็นองค์ประกอบมากขึ้น และค่าสภาพแพร่ความร้อนของข้าวเปลือกจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น (Sweat และ Haugh, 1974) ซึ่งผลิตภัณฑ์แต่ละชนิดจะมีความสัมพันธ์ระหว่างความชื้นกับสมบัติทางความร้อนของอาหารแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิดกับความชื้น

ผลิตภัณฑ์	ความชื้น (ร้อยละ)	สมการ	เอกสารอ้างอิง
ถั่วเหลือง	0.4-24.5	$C_p = 0.39123 + 0.0046057M$	Alam และ Shove, 1972
ข้าวสาลี	0-20	$C_p = 0.334 + 0.00977M$	Kazarian และ Hall, 1965
ข้าวฟ่าง	0-30	$C_p = 0.3337 + 0.0077M$	Sharma และ Thompson, 1973
citrus	0-90	$C_p = 0.347 + 0.00601M$	Mohsenin, 1980
ข้าวฟ่าง	0.1-22.5	$k = 0.0977 + 0.0015M$	Kazarian และ Hall, 1965
ผักและผลไม้	มากกว่า 60	$k = 0.148 + 0.00493M$	Sweat, 1974

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2.1.2 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของอาหาร เช่น ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเส้นใย จะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหาร ดังนั้นอาหารที่มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ก็จะมีสมบัติทางความร้อนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ทิศทางของเส้นใยที่ต่างกัน (ขนานหรือตั้งฉากกับทิศทางของการถ่ายโอนความร้อน) ก็จะมีผลต่อสมบัติทางความร้อนของอาหารด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ (Baghe-Khandan, Okos และ Sweat, 1982) เนื่องจากในเนื้อสัตว์มีเส้นใยมาก

ตัวอย่างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความร้อนจำเพาะกับองค์ประกอบทางเคมีของอาหาร (Heldman, 1979) เช่น

$$C_p = 0.5X_F + 0.3X_S + 1.0X_M \quad .....(16)$$

2.2.2 ปัจจัยจากภายนอก

ปัจจัยจากภายนอกที่สำคัญได้แก่ อุณหภูมิ ซึ่งพบว่าอาหารชนิดเดียวกันแต่มีอุณหภูมิแตกต่างกันจะมีสมบัติทางความร้อนที่ต่างกัน เช่น เปลือกถั่วลิสงจะมีค่าความร้อนจำเพาะเพิ่มขึ้นเมื่อมีอุณหภูมิสูงขึ้น (Suter, Agrawal และ Clary, 1975) มันฝรั่งมีค่าสภาพนำความร้อนเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (Lamberge และ Hallstrom, 1986) และเมื่ออุณหภูมิของมะพร้าวเพิ่มขึ้น ค่าสภาพแพร่ความร้อนจะเพิ่มขึ้นด้วย (Murakami, 1980) โดยทั่วไปอาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็งจะมีค่าความร้อนจำเพาะต่ำกว่าอาหารที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง เนื่องจากน้ำแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.472 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส ขณะที่น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ 0.999 แคลอรี/กรัม องศาเซลเซียส แต่อาหารที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง มีค่าสภาพนำความร้อนสูงกว่าที่อุณหภูมิสูงกว่าจุดเยือกแข็ง เนื่องจากค่าสภาพนำความร้อนของน้ำแข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส มีค่าเท่ากับ 2.38 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน แต่น้ำที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส มีค่าสภาพนำความร้อนเท่ากับ 0.597 วัตต์/เมตร องศาเคลวิน สำหรับสมการซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารชนิดต่าง ๆ กับอุณหภูมิ แสดงไว้ในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสมบัติทางความร้อนของอาหารบางชนิดกับอุณหภูมิ

ผลิตภัณฑ์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	สมการ	เอกสารอ้างอิง
เนยถั่วลิสง	20-80	$C_p = 0.361 + 0.0012T$	Ward, Singleton และ Freeman, 1950
นมผง	16.6-42.8	$k=0.0003+0.00464T-0.000058T^2$	MacCarthy, 1985
ซอสมะเขือเทศ	30-50	$k = 0.482 + 0.0015T$	Drusas และ Saravacos, 1985
มันฝรั่ง	20-90	$k = 0.624 + 0.00119T$	Lamberge และ Hallstrom, 1986
เปลือกถั่วลิสง	4.4-37.8	$\alpha = 1.32x10^{-7} - 5.16x10^{-10}T$	Mohsenin, 1980

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 ลักษณะทั่วไปของมะละกอและมะม่วง

2.3.1 มะละกอ

มะละกอมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ Carica papaya อยู่ในวงศ์ Caricaceae มีถิ่นกำเนิดในประเทศแถบร้อนของอเมริกากลาง เม็กซิโกตอนใต้ และคอสตาริกา มะละกอเป็นผลไม้ที่มีความชื้นสูงถึงประมาณร้อยละ 90 มีองค์ประกอบทั่วไปดังตารางที่ 2.5 สำหรับในประเทศไทยพันธุ์ของมะละกอที่พบคือ แขกดำ โกโก้ สายน้ำผึ้ง โซโล และซันไรส์ แต่พันธุ์ที่เป็นที่ต้องการของตลาดต่างประเทศ และนิยมนำมาแปรรูปมากที่สุดคือพันธุ์แขกดำ (มะละกอ, 2529) ซึ่งมะละกอพันธุ์แขกดำจะมีส่วนหัวและปลายเกือบเท่ากัน ผลที่ดิบจะมีเปลือกสีเขียวเข้ม เนื้อแน่นหนา และกรอบ ผลมีน้ำหนัก 500-700 กรัม/ผล เมื่อสุกมีเนื้อสีแดงเข้ม แข็ง รสหวาน มีเมล็ดน้อย และมีช่องว่างภายในแคบ มีน้ำหนัก 1500-2000 กรัม/ผล (มะละกอ, 2524; เลอศักดิ์ จตุรภุช, 2527) มะละกอถูกนำไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น มะละกอในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง แยมมะละกอ มะละกอผง มะละกอแผ่นกรอบ และเยลลี่มะละกอ เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 องค์ประกอบทั่วไปของมะละกอ (ตารางแสดงคุณค่าอาหารไทย, 2527)

องค์ประกอบ	ปริมาณ
น้ำ (%)	86.9-93.1
โปรตีน (%)	0.6-0.8
ไขมัน (%)	0.1-0.3
คาร์โบไฮเดรต (%)	4.2-11.3
เส้นใย (%)	0.5-0.9
เถ้า (%)	0.2-1.1
แคลเซียม (mg/100 g)	3-12
ฟอสฟอรัส (mg/100 g)	10-22
เหล็ก (mg/100 g)	0.3-2.5
วิตามิน A (I.U./100 g)	4354
วิตามิน B_1 (mg/100 g)	0.03-0.04
วิตามิน B_2 (mg/100 g)	0.03-0.10
ไนอาซีน (mg/100 g)	0.2-0.3
วิตามิน C (mg/100 g)	44-78

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3.2 มะม่วง

มะม่วงมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Mangifera india จัดอยู่ในวงศ์ Anacardiaceae มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย และพม่า มะม่วงที่พบมีหลายพันธุ์ได้แก่ อกร่อง เขียวเสวย หนังกลางวัน น้ำดอกไม้ สายฝน หนองแซง แรด สามปี ทองดำ และแก้ว แต่มะม่วงพันธุ์แก้วเป็นพันธุ์ที่นิยมใช้ในการแปรรูปมากที่สุด (สายใจ ลีมาวิจัย, 2532) มะม่วงพันธุ์แก้วมีความชื้นสูงถึงร้อยละ 80 และมีองค์ประกอบทั่วไป ดังตารางที่ 2.6 ตามปกติมะม่วงพันธุ์นี้มีเปลือกค่อนข้างหนา เหนียว และมีต่อมน้ำมันใหญ่ เมื่อยังดิบมีเปลือกสีเขียวเข้ม เนื้อสีนวล หยาบ รสเปรี้ยว และมีแป้งมาก เมื่อห่ามจะมีรสมันอมเปรี้ยว ผลกลม ป้อม เมื่อสุกจะมีสีเขียวปนเหลือง เนื้อสีเหลือง หยาบ มีรสหวานอมเปรี้ยว (ถวิล ข่ายสุวรรณ, 2522) ผลของมะม่วงพันธุ์แก้วจะมีขนาดกว้างประมาณ 8.5 เซนติเมตร ยาวประมาณ 12.1 เซนติเมตร และหนาประมาณ 5.4 เซนติเมตร ผลจะประกอบด้วยส่วนเปลือกและเมล็ดร้อยละ 47.26 และส่วนเนื้อร้อยละ 52.74 มะม่วงพันธุ์แก้วถูกนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด เช่น มะม่วงในน้ำเชื่อมบรรจุกระป๋อง แยมมะม่วง และมะม่วงกวน เป็นต้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.6 องค์ประกอบทั่วไปของมะม่วง (ตารางแสดงคุณค่าอาหารไทย, 2527)

องค์ประกอบ	ปริมาณ
น้ำ (%)	76.7-81.0
โปรตีน (%)	0.5-0.6
ไขมัน (%)	0.1-0.2
คาร์โบไฮเดรต (%)	17.6-21.7
เส้นใย (%)	0.5-0.7
เถ้า (%)	0.2
แคลเซียม (mg/100 g)	14-34
ฟอสฟอรัส (mg/100 g)	2-10
วิตามิน A (I.U./100 g)	717-808
วิตามิน B_1 (mg/100 g)	0.05
วิตามิน B_2 (mg/100 g)	0.02-0.06
ไนอาซีน (mg/100 g)	0.2-1.1
วิตามิน C (mg/100 g)	160-197

สำหรับในงานวิจัยนี้เลือกใช้มะละกอพันธุ์แขกดำ และมะม่วงพันธุ์แก้ว เนื่องจากผลไม้ทั้ง 2 ชนิด นิยมนำมาใช้แปรรูปมากที่สุดและเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค มาทดลองหาผลของอุณหภูมิและความชื้นที่มีต่อสมบัติทางความร้อน ตลอดจนศึกษาถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว